



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

KONŠTRUKCIA TERMoeLEKTRICKÉHO CHLADIACEHO ZARIADENIA

THERMOELECTRIC COOLER CONSTRUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN MURGAŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARIÁN BRÁZDIL

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Murgaš

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce termoelektrického chladícího zařízení

v anglickém jazyce:

Thermoelectric cooler construction

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Teoretická část bakalářské práce zaměřená na popis Peltierových článků, dosažitelných koeficientů COP, možných typů napájení a způsobů regulace. Praktická část práce zaměřená na konstrukci malého termoelektrického chlazení.

Cíle bakalářské práce:

1. Popis funkce Peltierových článků a fyzikálních principů termoelektrické přeměny
2. Matematický popis termoelektrické přeměny, používané modely pro Peltierovy články
3. Přehled možných způsobů regulace termoelektrického chlazení
4. Konstrukční návrh termoelektrického chlazení pro vybranou aplikaci

Seznam odborné literatury:

1. GOLDSMID, H. J. Introduction to thermoelectricity. Heidelberg : Springer, 2009. xvi, 242 s. Springer Series in Materials Science. ISBN 978-3-642-00715-6.
2. ROWE, D. M. (ed.). Thermoelectrics handbook : macro to nano. 1st ed. [Boca Raton] : CRC Press, 2006. 1014 s. ISBN 978-0849322648.
3. Odborné články z vědeckých databází ScienceDirect, SpringerLink, Knovel a IEEEExplore
4. Firemní literatura výrobců termoelektrických modulů

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marian Brázdil

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 20.11.2014



J. Pospíšil

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

J. Katolický

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa bude venovať popisu Peltierových článkov a podrobnému popisu termoelektrických javov na ktorých princípe fungujú. Ďalej sa budú spomínať termoelektrické materiály a ich vlastnosti a rôzne aplikácie termoelektrických modulov. Následne bude popísaný výpočet tepelných strát chladničky. Ďalej sa bude popisovať matematický model Peltierových článkov a ich dosiahnuteľné účinnosti. Takisto je spomenutý spôsob montovania článkov a rôzne spôsoby ich napájania a regulácie. Experimentálna časť sa zaoberá výpočtom a návrhom aplikácie daného článku.

ABSTRACT

Bachelor thesis will concern description of Peltier modules and detailed description of thermoelectric phenomena's on which is principle of these modules based on. Thermoelectric materials and their properties will be mentioned as well as different applications of Peltier modules. Heat losses of the cooler will be described. Onwards it describes mathematical model of Peltier modules and their coefficient of performance. Also mounting of modules, types of power supply and types of regulation are mentioned. Experimental part consists of calculation and designing of cooling assembly.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Peltierov jav, Seebeckov jav, termoelektrické javy, termoelektrické moduly, peltierov článok, termoelektrické chladenie, napájanie, regulácia

KEY WORDS

Peltier Effect, Seebeck Effect, Thermoelectric Phenomena, Thermoelectric Modules, Peltier Modules, Thermoelectric Cooling, Power Supply, Regulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MURGAŠ, Martin. *Konštrukcia termoelektrického chladiaceho zariadenia: bakalárska práca*.
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 45 s.
Vedúci bakalárskej práce Ing. Marián Brázdil.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému Konštrukcia termoelektrického chladiaceho zariadenia vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname.

29.5.2015

V Brne dňa.....

.....

Martin Murgaš

POĎAKOVANIE

Týmto by som rád poďakoval Ing. Mariánovi Brázdilovi za ochotný prístup, dôležité pripomienky a cenné rady, pri vypracovaní bakalárskej práce. Tiež by som rád poďakoval mojej rodine za podporu, ktorú mi počas celého štúdia poskytla.

OBSAH

| | |
|--|----|
| 1. Úvod | 10 |
| 2. Popis funkcie peltierových článkov | 11 |
| 2.1. Seebeckov jav | 11 |
| 2.2. Peltierov jav | 12 |
| 2.3. Thomsonov jav | 14 |
| 2.4. Termoelektrické materiály | 14 |
| 2.5. Termoelektrické články | 15 |
| 3. Peltierove články | 16 |
| 3.1. Základný popis peltierovho článku | 16 |
| 3.2. Spôsob montáže Peltierových článkov | 17 |
| 3.2.1. Šróbový spoj | 18 |
| 3.2.2. Lepenie | 18 |
| 3.2.3. Pájanie | 19 |
| 3.3. Spôsob napájania a regulácie | 20 |
| 4. Matematický popis výpočtu chladenia | 23 |
| 4.1. Výpočet tepelných strát | 23 |
| 4.2. Výpočet koeficientu COP | 25 |
| 5. Návrh chladenia | 30 |
| 5.1. Návrh geometrie a výpočet tepelných strát | 30 |
| 5.2. Výber peltierovho článku a výpočet COP | 35 |
| 6. Záver | 37 |
| ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV | 38 |
| ZOZNAM VELIČÍN | 40 |
| ZOZNAM TABULIEK | 43 |
| ZOZNAM OBRÁZKOV | 44 |
| ZOZNAM PRÍLOH | 45 |

1. ÚVOD

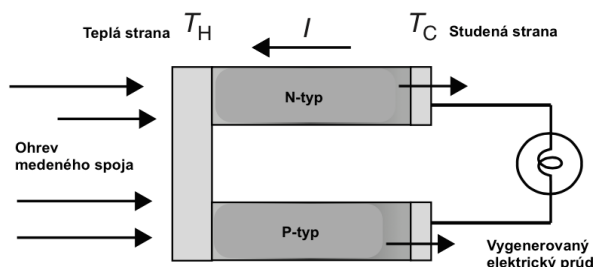
V dnešnej dobe sa vo väčšine chladiacich zariadení používajú klasické chladiace systémy s tekutým chladiacim médiom. Tieto systémy sú jednoduché a v bežných aplikáciách účinnjšie ako termoelektrické chladenie. Naopak pri chladení malých výkonov termoelektrické chladenie dosahuje lepšie výkonnosti ako kompresorové. U kompresorových systémov teplota, ktorú chceme chladením dosiahnuť kolísava okolo požadovanej hodnoty. Je to spôsobené tým, že tieto systémy najskôr chladia na plný výkon a potom sú vypnuté a stále sa to dokola opakuje. Aj kôli tomuto problému je predmetom práce návrh termoelektrického chladiaceho zariadenia. Termoelektrické chladienie má množstvo výhod, napríklad nieje dôležité uloženie (orientácia) tohto zariadenia, nieje potrebné chladiace médium, je to viac ekologické, dá sa presne regulovať. V tejto práci sa budeme zaoberať nájdením kompromisu medzi maximálnym chladiacim výkonom a maximálnou účinnosťou chladenia.

Takéto chladiace systémy sa už v dnešnej dobe používajú a aj keď vzrástol po nich dopyt stále nie sú veľmi rozšírené a používajú sa skôr na špeciálne aplikácie. Tento systém má veľký potenciál a po zdokonalení by sa jeho použitie mohlo rozšíriť. Zdokonalenie by mohlo prebehnúť v podobe vývoja nových termoelektrických materiálov.

2. POPIS FUNKCIE PELTIEROVÝCH ČLÁNKOV

2.1. SEEBECKOV JAV

Je to prvý termoelektrický jav, ktorý bol objavený T. J. Seebeckom v roku 1821. Podstata tohoto javu spočíva v tom, že ak budme ohrievať spoj medzi dvomi elektrickými vodičmi, vyprodukuje to elektromotorické napätie. Môžeme to demonštrovať na nasledujúcom príklade. Spojíme dva konce kovových vodičov medeným plechom a ich opačné konce pripojíme na galvanometer alebo citlivý voltmeter. Po nahrievaní spoja sa na meracích zariadeniach objaví malé napätie. Veľkosť tohoto napätia je závislá na rozdiel medzi teplotou spoja dvoch kovov a teplotou spojenia s meriacím zariadením. Tento jav je znázornený na obrázku 1.[2]



Obr. 1 Seebeckov jav [2]

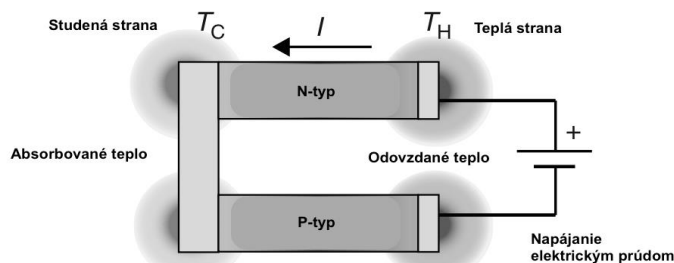
Seebeckov jav je umožnený prechodom elektrónov medzi dvomi kovovými materiálmi. Zohriatím spoja dvoch kovov sa umožní presun elektrónov z materiálu v ktorom majú nižšiu energiu do materiálu v ktorom elektróny vykazujú vyššiu energiu, tým vznikne elektromotorické napätie. Seebeck zistil, že tento fenomén sa prejavuje v mnohých materiáloch (niektoré z nich dnes poznáme ako polovodiče) a usporiadal tieto materiály podľa veľkosti Seebeckovho koeficientu α a elektrickej vodivosti σ . Seebeckov koeficient sa uvádza vo voltoch na stupne celzia ale častejšie v mikrovoltoch na Kelvín. Prepojením dvoch materiálov dostaneme diferenciálny Seebeckov koeficient. [2], [3]

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B (VK^{-1}) \quad (1.1)$$

$$\alpha_{AB} = \frac{dU_{AB}}{dT} (VK^{-1}) \quad (1.2)$$

2.2. PELTIEROV JAV

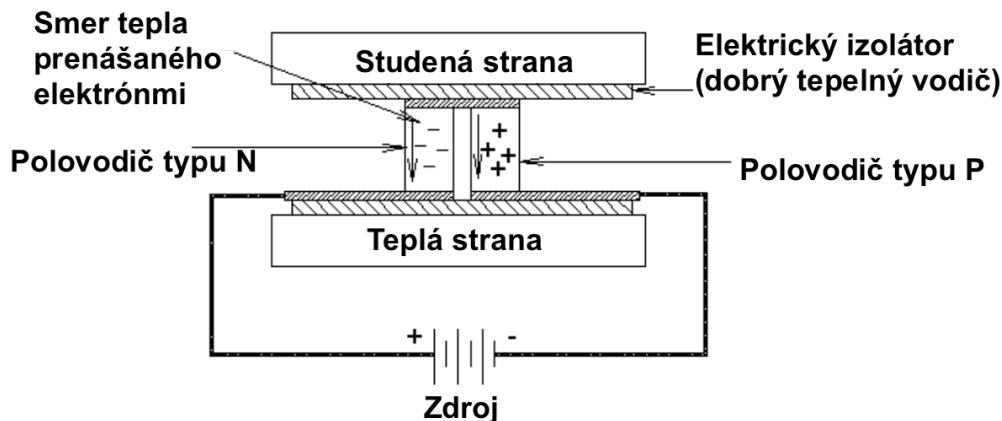
Tento jav bol objavený J. Peltierom o dvanásť rokov neskôr ako Seebeckov jav, sú to inverzné javy. Pri prechode elektrického prúdu termoelektrickou dvojicou sa spoj medzi dvomi kovmi začne ohrievať alebo ochladzovať v závislosti na smere prúdu, tento jav je znázornený na obrázku 2. [2]



Obr. 2 Peltierov jav [2]

Elektróny sú častice, ktoré dokážu prenášať elektrický prúd a aj teplo. Prúd sa šíri vtedy ak sa voľné elektróny môžu pohybovať z jedného energického stavu do druhého. V polovodičoch môže byť prúd prenášaný elektrónmi alebo kladne nabitými dierami. Podľa toho sa polovodiče rozdeľujú na polovodiče typu n a p. [2]

Polovodič typu p je materiál tvorený z atómov, ktoré obsahujú menej elektrónov ako je potrebné na dokončenie atómovej väzby v kryštalickej mriežke. Keď sa do tohoto materiálu pustí prúd elektróny majú tendenciu dokončiť atómovú väzbu. Elektróny sa odedia od atómov v kryštálovej mriežke a na ich mieste vznikne kladne nabitá diera, následne sa presunú do inej kladnej diery. Presúvaním elektrónov medzi kladne nabitými dierami je umožnené šírenie prúdu, pričom za nosič náboja sú považované kladné diery. [1]



Obr. 3 Prenos tepla v článku [7]

Polovodiče typu n a p sú spojené medeným vodičom v ktorom sa elektróny pohybujú omnoho ľahšie. Keď elektróny opustia p polovodič zanechajú za sebou kladné diery ktoré sa pohybujú smerom ku teplému koncu polovodiča. Elektrón musí prijať energiu aby dosiahol energickú hladinu elektrónov v medenom vodiči. Túto energiu dostane absorbovaním tepla teda táto strana polovodiča sa ochladí. Na opačnej strane polovodiča vstupujú do voľných kladných dier elektróny, ktoré klesnú na nižšiu energickú hladinu a tým sa uvoľní teplo. [1]

Polovodič typu n je tvorený atómami, ktoré obsahujú viac elektrónov ako je potrebné na dokončenie atómovej väzby v kryštalickej mriežke. Keď je do materiálu pustený prúd tieto elektróny sa ľahko dostanú do pásma vodivosti, je však potrebná energia na to aby sa dostali na rovnaký energický level ako elektróny ktoré prídu do polovodiča zo spoja. Táto energia je získaná absorbovaním tepla. Elektróny postupujú od studeného konca k teplému, kde opäť klesnú na nižšiu energickú hladinu a energia sa uvoľní v podobe tepla. Toto je jednoduché vysvetlenie zložitých fyzikálnych dejov, ktoré v materiáloch prebiehajú. Výkonnosť modulu závisí na viacerých premenných, ako napríklad na veľkosti prúdu, vlastnostiach materiálu, geometrii prvku alebo počte termoelektroch dvojit. [1]

Absolútny Peltierov koeficient definujeme na termoelektrickom článku podobne ako Sebeckov koeficient. Tento koeficient predstavuje vzťah prúdu, ktorý článkom prechádza ku veľkosti tepla, ktoré je tvorené alebo pohlcované spojom dvoch materiálov. [2]

$$\pi_{AB} = \frac{Q}{I} (V) \quad (1.3)$$

Vzťah medzi relatívnym Seebeckovým a relatívnym Peltierovým koeficientom je daný nasledujúcou rovnicou. [2]

$$\alpha_{AB} = \frac{\pi_{AB}}{T} (VK^{-1}) \quad (1.4)$$

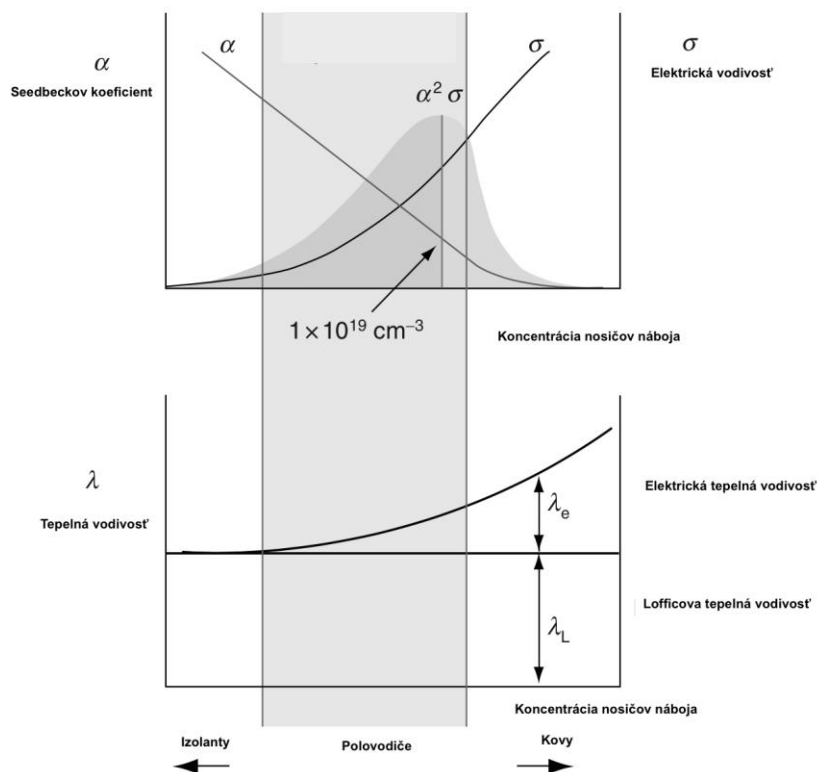
2.3. THOMSONOV JAV

Thomson pri svojom výskume prišiel na to, že vo vodiči s teplotným gradientom pri prechode prúdu vzniká teplo Q . Toto teplo sa dá vypočítať z nasledujúcej rovnice kde, β je Thomsonov koeficient. Jednotka tohto koeficientu je rovnaká ako pri Seebeckovom koeficiente. Hodnota tepla, ktoré vznikne je malá ale pri detailnom výpočte by sa na tento jav nemalo zabúdať. [2],[5]

$$Q = I\beta\Delta T(J) \quad (1.5)$$

2.4. TERMoeLEKTRICKÉ MATERIÁLY

Jednou z vlastností materiálov, podľa ktorých sa materiály rozlišujú je elektrická vodivosť. Kovy majú vysokú vodivosť, izolátory majú naopak nízku až nulovú vodivosť a polovodiče sa nachádzajú medzi nimi. Elektrická vodivosť závisí na počte nosičov náboja. Elektrická vodivosť narastá s rastúcim počtom nosičov, zatiaľ čo Seebeckov koeficient s rastúcim počtom nosičov klesá. Optimálny koeficient termoelektrickej účinnosti Z dosahujú materiály s koncentraciou nosičov aká je u polovodičových materiálov. Polovodičové materiály sú preto najviac skúmané a používané pre termoelektrické aplikácie. [2]



Obr. 4 Závislosť tepelnej a elektrickej vodivosti materiálov [2]

Termoelektrické javy sa prejavujú takmer vo všetkých vodivých materiáloch. Koeficient termoelektrickej účinnosti sa mení s teplotou a preto sa ako merítka používa bezrozmerná veličina ZT , kde T je absolútna teplota. Termoelektrické materiály sú materiály s hodnotami ZT 0,5. Termoelektrické materiály sú podľa rozmedzí operačných teplôt, rozdelené do troch skupín. Zliatiny na bázy bizmutu v kombinácii s antimónom, telúrom a selénom sú označované ako nízko teplotné materiály. Môžu byť použité do približne 450 K a používajú sa na termoelektrické chladenie. Pri týchto teplotách sa nepoužívajú skoro žiadne iné materiály. Stredný teplotný rozsah je približne do 850 K a tu sa používajú zliatiny telúru olovnatého. Horný teplotný rozsah je do 1300 K a tu sa používajú zliatiny kremíku a germánia. Termoelektrické materiály sú najčastejšie vyrobené usmerňovanou kryštalizáciou z taveniny alebo práškovou metalurgiou. Každý z týchto spôsobov má svoje výhody, ale častejšie sa používa kryštalizácia. Tieto materiály sa stále používajú ale zároveň prebieha výskum v objavovaní nových materiálov kôli nedostačujúcim vlastnostiam. Vedci sa pokúšajú vytvoriť materiály s nižšou tepelnou vodivosťou, čo by zvýšilo koeficient termoelektrickej vodivosti. [2]

2.5. TERMOELEKTRICKÉ ČLÁNKY

Termoelektrické články sa používajú na rôzne účely napríklad na chladenie, používajú sa aj ako generátory elektrického prúdu alebo v meracích prístrojoch. Termoelektrické moduly na chladenie sa používajú napríklad v laserových diodách, vesmírnych teleskopoch, satelitoch, malých chladničkách, prenášacích chladiacich boxoch, nočnom videní, armáde a ďalších možných aplikáciách. Konštrukcia týchto článkov je veľmi podobná ale pre lepšie účinnosti by mali byť termočlánky používané pre generátory krátke a hrubé a pre chladiace zariadenia dlhé a tenké. Tieto články sú okrem iného tvaru aj z rôznych materiálov a zhotovujú sa rozličnými spôsobmi. Termoelektrické moduly na chladenie bývajú rôznych veľkostí, najčastejšie od $1,5 \text{ mm}^2$ do viac ako 50 mm^2 . Pre zväčšenie teplotného rozdielu môžeme použiť viacstupňový článok, kde článok v prvom stupni slúži ako chladič pre článok v nasledujúcom stupni. Tieto články majú pyramídovitý tvar kôli tomu aby chladiaca kapacita teplejších stupňov bola väčšia ako u tých, ktoré pracujú pri nižších teplotách. Limitujúcim faktorom viacstupňových článkov je elektrický odpor, ktorý z počtom stupňov rastie. Napriek tomu sa ojedinele používajú aj šesťstupňové články. [5], [2]



Obr. 5 Rôzne tvary modulov [18]

3. PELTIEROVE ČLÁNKY

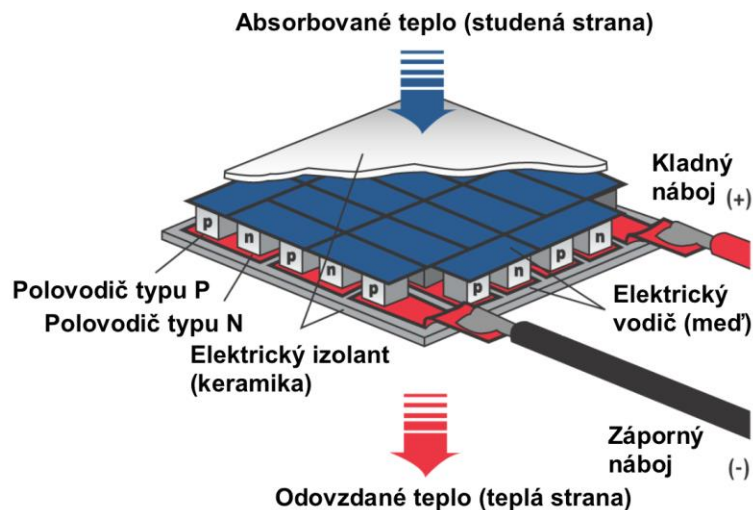
3.1. ZÁKLADNÝ POPIS PELTIEROVHO ČLÁNKU

Termoelektrický chladič sa skladá z dvoch alebo viacerých prvkov z polovodičového materiálu. Polovodiče sú navzájom spojené elektricky dobre vodivým materiálom, ku ktorému sú pripájané. Pájkové spoje obmedzujú funkciu článku pretože maximálna pracovná teplota musí byť nižšia alebo rovná teplote tavenia pájky vid' Tab1. Kôli dobrej životnosti býva pracovná teplota vždy nižšia. Polovodičové prvky sú typu p a n a musia sa striedať, ako sme už spomínali v predchádzajúcej kapitole. Jeden polovodič typu p a jeden polovodič typu n tvoria spolu termoelektrickú dvojicu. Najčastejšie býva použitá meď na spojenie n a p polovodičov. Meď sa dobre pája, má výbornú vodivosť avšak jej nevýhodou je, že difunduje do polovodičového materiálu a tým zhoršuje účinnosť článku. [5]

Najčastejšie používané pájky sú Sn-Pb. Olovo má nižšiu teplotu tavenia takže čím je jeho obsah väčší tým je nižšia celková teplota tavenia pájky. Teploty tavenia rôznych druhov pájok sú uvedené v nasledujúcej tabuľke. Pracovná teplota modulu by mala byť nižšia od týchto teplôt aby sa predišlo poškodeniu modulu. Výrobca TE Technology uvádza, že pracovné teploty by mali byť o približne 30-50 stupňov nižšie ako teploty tavenia pájok. [5], [4]

Tab. 1 Teploty tavenia pájok [4], [9]

| Druh pájky | Teplota tavenia v °C |
|------------------|----------------------|
| 95Sn-5Pb | 232 |
| 99,3Sn-0,7Cu | 227 |
| 96,5Sn-3,5Ag | 221 |
| Sn/3,5Ag/1Cu/3Bi | 213 |
| 45Sn-55Pb | 204 |
| 60Sn-40Pb | 186 |
| 63Sn-37Pb | 183 |
| 62Sn-36Pb-2Ag | 179 |
| 58Bi-42Sn | 138 |



Obr. 6 Peltierov článok [7]

Peltierov článok obsahuje množstvo termoelektrických dvojíc elektricky sériovo a tepelne paralelne spojených. Toto zapojenie umožňuje tepelný tok medzi keramickými platňami iba jedným smerom pričom prúd tečie v polovodiči typu N z teplej strany na studenú a v polovodiči typu P tečie presne opačným smerom. Termoelektrické dvojice sú umiestnené medzi dvoma doskami z tepelne dobre vodivého materiálu. Dosky mechanicky držia celú štruktúru tvorenú z termoelektrických dvojíc pokope a zároveň elektricky izolujú jednotlivé prvky navzájom od seba a od vonkajších montážnych plôch. Dosky sú vyrábané z keramiky kôli dobrej tepelnej vodivosti a elektrickým izolačným vlastnostiam. Používajú sa materiály na bázi oxidu hlinitého (sú lacnejšie) a oxidu berýlnatého (omnoho drahšie, omnoho lepšia tepelná vodivosť). Medené vodiče môžu byť spojené s keramickými doskami viacerými spôsobmi, podrobnejší popis je uvedený v kapitole číslo 5. Počet termoelektrických dvojíc – termočlánkov závisí na požadovanej chladiacej kapacite a maximálnej veľkosti prúdu. Limitou pri veľkosti modulu je veľkosť termočlánkov a ich mechanická integrita. Limitujúcim faktorom jednoradých modulov je takisto koeficient termoelektrickej účinnosti polovodičových materiálov. [6]

3.2. SPÔSOB MONTÁŽE PELTIEROVÝCH ČLÁNKOV

Pri zostavovaní peltierovho článku máme na výber z viacerých konštrukčných prevedení. Na spojenie článku s okolím môžeme použiť lepenie, pájanie alebo šróbový spoj. Výber správnej techniky je dôležitý. Musíme dbať aj na to aby inštalácia bola správne prevedená, v opačnom prípade môže dôjsť ku strate výkonu alebo spoľahlivosti. Styčné plochy musia byť rovné, paralelne a čisté aby sa minimalizoval tepelný odpor. Pri výbere musíme brať v úvahu podmienky akým je článok vystavený napríklad vlhkosť, vibrácie prípadne vysoká teplota. [4]

3.2.1. ŠRÓBOVÝ SPOJ

Termoelektrický modul sa upevní zvyčajne medzi chladič a povrch telesa, ktoré chladíme. Výhoda šróbového spoja je v tom, že je rozoberateľný a v prípade poruchy je možné peltierov článok vymeniť alebo opraviť. Moduly malých rozmerov majú veľkú stratu tepla cez šróbové spoje a tieto spoje zaberajú veľa miesta. Tento spôsob sa preto používa u väčších jednoradých modulov. Pri montáži musíme dbať na to aby kontaktné plochy boli zbavené všetkých otrepov, špiny a iných nečistôt. Plocha by mala byť rovinná s maximálnou drsnosťou 0,025 mm. Vrchná a spodná plocha termoelektrického modulu sa väčšinou potiera vrstvou teplovodivej pasty. Teplovodivá pasta sa používa na to aby zaplnila drobné nerovnosti v povrchu, tým pádom je teplo prenášané celou plochou modulu. Hrúbka vrstvy musí byť primeraná pretože jej nadmerné množstvo znižuje tepelnú vodivosť. Tlak musí byť rovnomerne rozložený a preto by skrutky mali byť usporiadané symetricky. Skrutky musia byť utiahnuté na rovnaký momet a veľkosť momentu nemôže prekročiť stanovenú hodnotu inak sa zníži efektívnosť prenosu tepla a môže dôjsť aj k poškodeniu článku. [4], [5]

Tab. 2 Odporúčané kompresné tlaky [4]

| Druh modulu | Odporúčané kompresné tlaky: |
|---------------------|-----------------------------|
| Štandardný modul | 500-1200 kPa |
| Vysokovýkonný modul | 800-1200 kPa |
| Mikromodul | 200-600 kPa |
| Viacstupňový modul | 300-1000 kPa |

Minimalizáciu straty tepla cez skrutky dosiahneme použitím najmenších možných skrutiek, ktoré budú danej aplikácii vyhovovať. Väčšinou sa používajú skrutky z nerezovej ocele pre ich nízku tepelnú vodivosť. Pod hlavy skrutiek sa umiestňujú pružné podložky aby sa zachoval tlak pri normálnej teplotnej rozťažnosti komponentov. [4], [5]

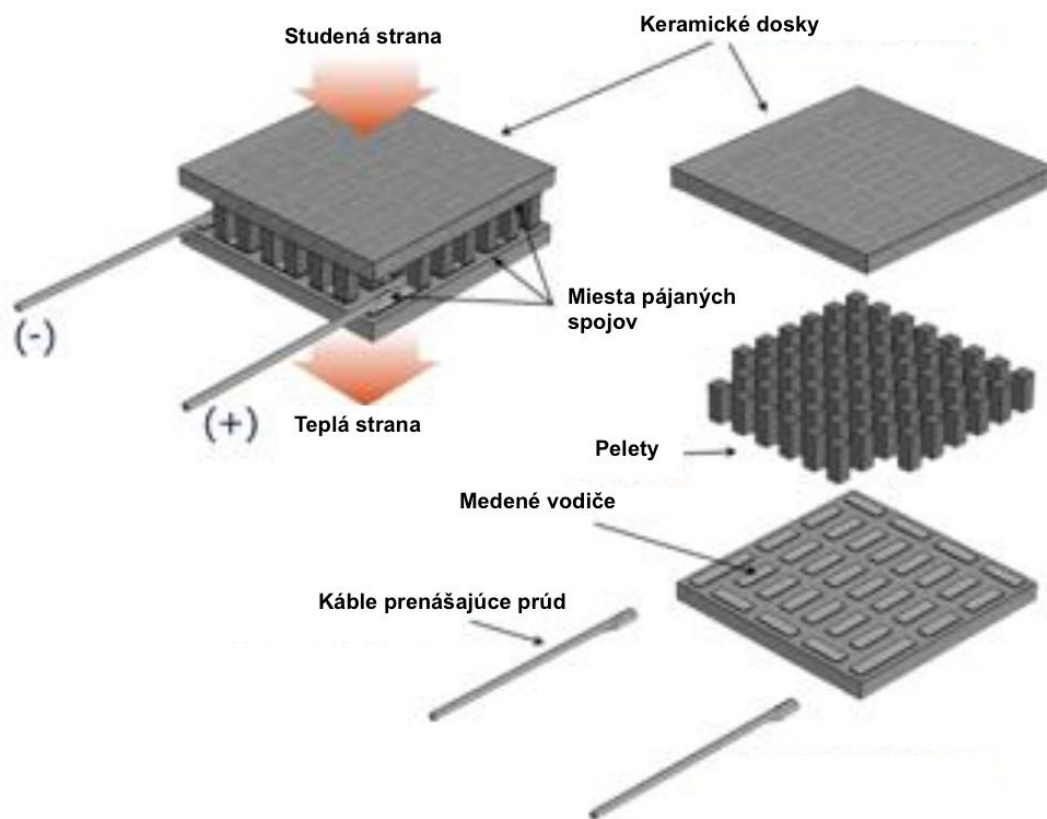
3.2.2. LEPENIE

Ďalší používaný spôsob montáže je lepenie modulu na jednu alebo obe strany montážnych plôch. Modul sa lepí pomocou epoxidového lepidla s veľmi vysokou vodivosťou. Výrobci neodporúčajú používať túto metódu u modulov väčších rozmerov kôli rozdielnym koeficientom teplotných rozťažností chladiča, modulu a chladeného objektu, hrozí totiž poškodenie. Tento spoj je veľmi ťažko rozoberateľný a väčšinou je to nemožné. Pri montáži musíme dbať na to aby montážne plochy boli rovinné avšak pri lepení epoxidom je to menej kritické ako u šróbových spojov. Dôležité je, tieto plochy dôkladne odmastniť a očistiť od otrepov a iných nečistôt. Po nanosení vrstvy epoxidového lepidla sa modul musí priložiť na požadované miesto a zaťažiť. Pri používaní

takto zostaveného chladenia, musíme zabezpečiť aby pracovná teplota modulu neprekročila teplotu pri ktorej sa začne rozpúšťať epoxidové lepidlo. [5], [4]

3.2.3. PÁJANIE

Termoelektrické moduly, ktoré majú pokovované externé plochy môžu byť spojené pájkami, musíme však zabezpečiť aby nedochádzalo k prehrievaniu modulov. Spojenie týmto spôsobom je nerozoberateľné. Pájkovanie by sa podľa výrobcov malo vykonávať iba na jednej strane modulu (väčšinou teplá strana) aby sa predišlo vysokému mechanickému namáhaniu modulu. Vzhľadom k tomu, že koeficienty teplotnej rozťažnosti keramického modulu, chladiča a chladeného telesa sa líšia, modul by nemal byť väčší ako 15 x 15 mm. Pájkovanie by sa takisto nemalo používať v aplikáciach kde dochádza ku teplotnému cyklovaniu. Maximálne pracovné teploty modulu závisia na pájkovacích materiáloch, ktoré sú použité. [5], [4]

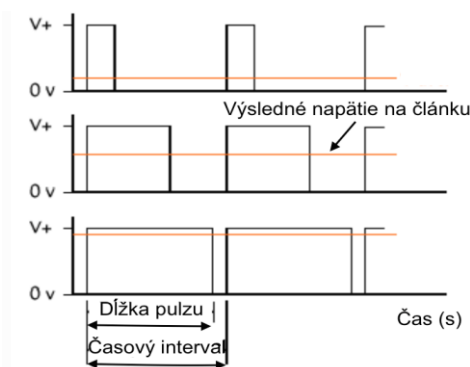


Obr. 7 Schéma pájania článku [19]

3.3. SPÔSOB NAPÁJANIA A REGULÁCIE

Termoelektrické chladiace moduly sa používajú na rôzne aplikácie, kde je potrebné presné nastavenie teploty. Vo výnimočných prípadoch dokážeme regulovať teplotu s presnosťou na 0.001 K. Presné riadenie teploty silno závisí na spôsobe napájania a regulácie. Častá aplikácia termoelektrických modulov je stabilizácia teploty kryštálu laserovej diody ak požadujeme stabilnú vlnovú dĺžku. Na reguláciu jednoduchých modulov sa používa dvojstavový regulátor a pri zložitejších aplikáciach sa používa PID regulátor. Jedným z možných spôsobov regulácie sú analógové riadiace jednotky. Tieto riadiace jednotky regulujú veľkosť prúdu pomocou tranzistoru, ktorý je sériovo zapojený s modulom. Reguláciou odporu tranzistora sa mení veľkosť prúdu, ktorý postupuje do modulu. Tento spôsob regulácie je nevýhodný kôli veľkému množstvu tepla, ktoré vzniká na tranzistore. [1]

Ďalšia možnosť regulácie je pomocou PWM riadenia. Táto metóda spočíva v cyklickom zapínaní a vypínaní prívodu prúdu vo veľmi krátkych časových intervaloch. Časové intervaly majú rovnakú dĺžku a počas intervalu je prúd naplo zapnutý a naplno vypnutý na určitú dobu. Čím kratšia je doba zapnutia, tým menšia je výsledná hodnota napätia na článku a naopak čím je doba zapnutia dlhšia, tým je výsledné napätie na module väčšie. Ideálnu frekvenciu pre PWM regulátory sa doposiaľ nepodarilo zistiť. Už v predchádzajúcej kapitole sme spomenuli, že teplotné cyklovanie modulu neprospíva. Keď sa vypne prívod prúdu v moduly sa začne vyrovnávať teplota a teplo prúdi z teplej strany na studenú. Pri tepelnom cyklovaní môže dôjsť ku rozpínaniu a sťahovaniu modulu čo vedie ku skráteniu jeho životnosti a poškodeniu. Nízka frekvencia PWM regulácie spôsobuje veľké teplotné zmeny v moduly. Vysoká frekvencia zaručí lineárnejší priebeh teploty ale je pri nej väčšia pravdepodobnosť vzniku nebezpečných pulzov ktoré môžu poškodiť článok. Test firmy TE Technology preukázal, že používanie tohoto typu napájania pri malých a veľkých frekvenciách výrazne neovplyvňuje výkonnosť modulu. [1]

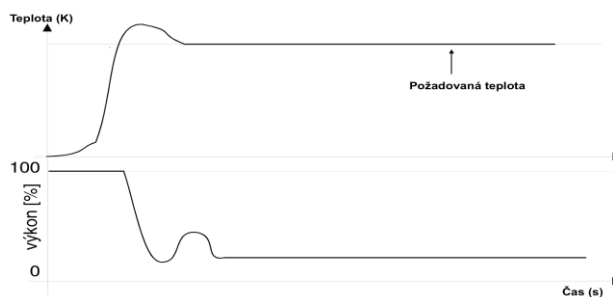


Obr. 8 Priebeh napätia pri PWM regulátore [1]

Výrobca ale uviedol, že pri dlhodobom testovaní by výsledky mohli byť iné. Keďže hodnoty dosiahnuté pri rôznych frekvenciách boli veľmi podobné, výrobca uviedol, že sa nedá presne

určiť, ktorá frekvencia je pre článok najideálnejšia. Výrobca TE Technology používa frekvencie od 300 Hz do 3000 Hz. [1]

PID regulácia je ďalšia možnosť riadenia výkonu modulu, má proporcionálnu, integračnú a derivačnú zložku. Princíp PID regulácie je komplikovanejší ako u predchádzajúceho regulátoru preto ju len v jednoduchosti popíšem. Termoelektrický modul je pri tomto spôsobe regulácie neustále napájaný čiže nedochádza k teplotnému cyklovaniu ako u PWM regulátorov. Podľa teploty chladeného objektu sa veľkosť prúdu idúca do modulu znižuje alebo zvyšuje a tým sa mení jeho výkon. Tieto zmeny výkonu sú veľmi presné a veľmi rýchle, je to najpresnejší spôsob regulácie. Jedinou nevýhodou je zložité nastavenie. [10]



Obr. 9 Priebeh teplôt pri PID regulácii [10]

Dôležitú úlohu pri regulácii zohráva spätná väzba, čím je meranie teploty. Voľba snímača závisí na druhu použitia a na základných parametroch ako sú teplotný rozsah, požadovaná linearita, veľkosť a citlivosť snímača. Najčastejšie sa používajú NTC (Negative temperature coefficient) snímače, majú vysokú citlivosť a malé rozmery. S rastúcou teplotou odpor týchto snímačov (nelineárne) klesá. NTC snímače dokážu zmerať aj rýchle zmeny teploty vďaka veľkej citlivosti. Môžeme ich takisto vhodne umiestniť vďaka malým rozmerom, ich hlavnou nevýhodou je veľká nelinearita. Ďalšou možnosťou sú integrované snímače teploty, ktoré majú výbornú linearitu v celom rozsahu meraných teplôt. Jednoducho sa pripájajú k riadiacemu systému a používajú sa keď nie je požadovaná veľká presnosť. Nevýhodou je ich pomalá odozva, ktorá trvá až desiatky sekúnd. [5]

Medzi ďalšie typy senzorov patria:

- a) 1-Wire DS18B20 je digitálny teplomer, ktorý sa takisto dá použiť na meranie teploty prostredia. Má funkciu alarmu s programovateľnými hornými a dolnými hranicami. S mikroprocesorom komunikuje cez zbernicu 1-Wire, ktorá vyžaduje iba jednu dátovú

linku. Rozsah jeho prevádzkových teplôt je od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ a s odchýlkou $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozsahu od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozsah napätí zdroja je povolený v rozmedzí od 3 V do $5,5\text{ V}$. Externý zdroj nie je potrebný pretože DS18B20 je napájaný priamo z dátovej linky. Každý jeden prístroj má unikátny 64-bitový sériový kód vďaka ktorému môžu byť na jednej zbernici zapojené viaceré teplomery a na ich ovládanie vystačí jeden mikroprocesor. Je to výhodné napríklad pri monitorovaní teploty vo vnútri budov.

- b) Senzor Pt100 sa používa na dosiahnutie vysokej presnosti merania. Jeho použitie je zjednodušené v mnohých elektrických aplikáciach vďaka lineárnej závislosti odporu na teplote. Odpor senzora lineárne narastá s teplotou. Výhodou tohoto senzora je rýchla odozva a malé rozmery. Používa sa v teplotných rozmedziach od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ s presnosťou $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, výrobca na požiadanie ponúka aj možnosť iných teplotných rozmedzí. Odpor pri 0°C je $100\text{ }\Omega$ z čoho je odvodený aj názov. Napájacie napätie musí byť podľa výrobcov v rozmedzí od 1 V do $6,4\text{ V}$. Na rozdiel od predchádzajúceho senzoru, Pt100 potrebuje 2 dátové linky. Tento senzor je vhodný na kontrolu ložísk, vodičov lišty, častí strojov a teploty vnutia. [11]

Vyrábajú sa taktiež senzory Pt500 a Pt1000, ktoré majú pri nula stupňoch odpory $500\text{ }\Omega$ a $1000\text{ }\Omega$. Senzor Pt1000 sa používa hlavne na meranie teploty oleja, vody a palív. V porovnaní s Pt100 má menší teplotný rozsah a menšiu presnosť. Teploty meria v rozmedzí od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ s presnosťou $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. [13], [14], [15]

- c) Ďalším meracím zariadením je termočlánok. Pri zahriatí spoja dvoch elektricky vodivých látok vzniká potenciálny rozdiel podľa ktorého sa určuje teplota spoja. Vďaka malým rozmerom termočlánkového spoja sa môže používať aj na dynamické meranie alebo meranie teploty povrchu. Termoelektrické teplomery sa rozdeľujú do viacerých skupín podľa rozsahu teplôt v ktorých môžu merať. Poznáme napríklad typ T (Cu-CuNi) s rozmedzím meracích teplôt -200 až $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ a oranžovým farebným označením alebo typ K (NiCr-NiAl) s rozmedzím -200 až $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ s žltým farebným označením. Zapojenie teplomera môže byť rôzne. Môžeme ho zapojiť napríklad priamo, toto zapojenie obsahuje iba jeden termočlánkový spoj, ktorý je umiestnený v meranom prostredí. Pomocou veľkosti napätia na voľných koncoch dokážeme určiť teplotu spoja. [12], [17]

4. MATEMATICKÝ POPIS VÝPOČTU CHLADENIA

4.1. VÝPOČET TEPELNÝCH STRÁT

Následujúcim výpočtom sa spočíta celkový tepelný výkon, ktorý bude treba odoberať peltierovým článkom z chladeného priestoru. Tento výpočet bol prevedený podľa zdroja [26]. Tento výpočet je rozdelený na výpočet pasívnych a aktívnych tepelných strát.

Pasívne stráty:

a) Stráty tepla vedením cez steny chladiaceho boxu:

Podľa navrhnutých rozmerov chladiaceho boxu spočítame vnútorný obsah stien chladeného priestoru. Všeobecný výpočet pre chladičku tvaru kvádra je popísaný nasledujúcou rovnicou.

$$S = 4ab + 2bc \quad (m^2) \quad (4.1.1)$$

Následne z hodnôt hrúbky stien a koeficientov prestupu tepla spočítame tepelný odpor steny.

$$R_s = \sum_1^n \frac{1}{\lambda_n} + \sum_1^n \frac{d_n}{\alpha_n} \quad \left(\frac{W}{Km^2} \right) \quad (4.1.2)$$

Ďalej spočítame rozdiel teploty medzi teplotou okolia a teplotou vnútri v chladenom priestore.

$$\Delta T_1 = T_{ok} - T_{vn} \quad (K) \quad (4.1.3)$$

Potom môžeme určiť merný tepelný tok stenami chladeného priestoru a následne aj celkový únik tepla Q_{st} .

$$q = \frac{\Delta T_1}{R_s} \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (4.1.4)$$

$$Q_s = qS \quad (W) \quad (4.1.5)$$

b) Stráta tepla radiáciou

Ďalšou zložkou pasívnych strát je stráta tepla radiáciou, ktorá sa spočíta nasledovným vzťahom.

$$Q_{rad} = FeSb_k S_o (T_p^4 - T_f^4) \quad (W)$$

(4.1.6)

c) Strata tepla prúdením

K tejto strate dochádza prúdením vzduchu vnútri v chladenom priestore. Vďaka tomu, že je vzduch okolo chladeného objektu v pohybe dochádza ku rýchlejšej výmene tepla. Túto zložku pasívnych strát spočítame nižšie uvedeným vzťahom.

$$Q_{ved} = \alpha_v S_{ob} (T_{ok} - T_{vn}) \quad (W) \quad (4.1.7)$$

Aktívne stráty:

a) Výkon potrebný na schladenie objektu

Táto zložka je závislá na čase za aký sa má teplo q_o z chladeného objektu odvieť. Čím je doba kratšia, tým väčší bude potrebný výkon na schladenie daného objektu.

$$q_o = m_o c_o \Delta T_2 \quad (J) \quad (4.1.8)$$

$$Q_{ob} = \frac{q_o}{t} \quad (W) \quad (4.1.9)$$

b) Výkon potrebný na schladenie vzduchu

Podobne ako chladený objekt aj vzduch okolo neho je potrebné vychladiť. Táto zložka tepelných strát býva väčšinou veľmi malá.

$$q_v = m_v c_{vz} \Delta T_v \quad (J) \quad (4.1.10)$$

$$Q_{vz} = \frac{q_{vz}}{t} \quad (W) \quad (4.1.11)$$

c) Stráty tepla spôsobené spotrebičom vnútri v chladenom priestore

Tieto stráty bývajú spôsobené napríklad ventilátormi alebo rôznymi senzormi, ktoré sa nachádzajú v chladenom priestore. Taktiež majú malú veľkosť v porovnaní s inými zložkami.

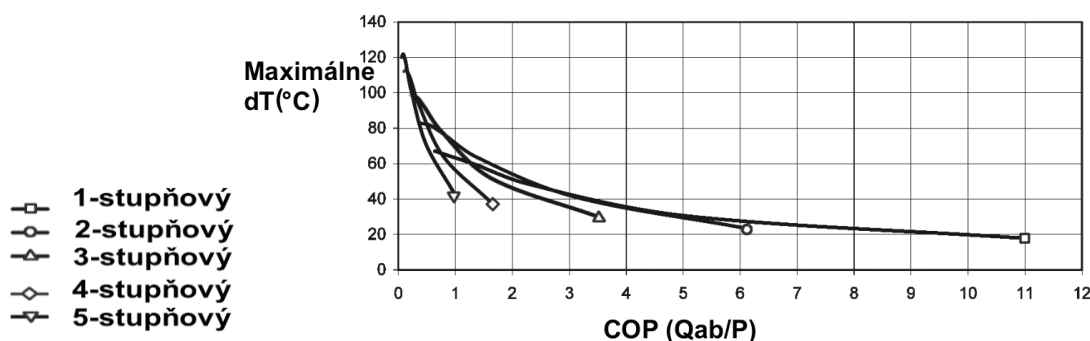
$$Q_{vc} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (W) \quad (4.1.12)$$

Sčítaním všetkých zložiek aktívnych a pasívnych strát dostaneme celkový tepelný výkon, ktorý je potrebné odviesť z chladeného priestoru.

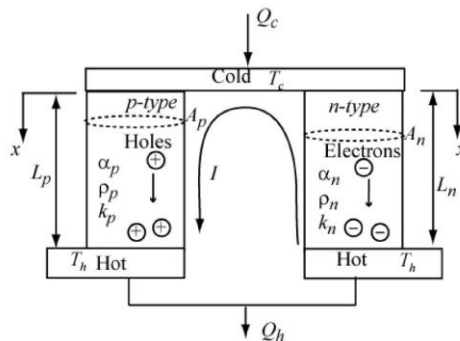
$$Q_{po} = Q_{st} + Q_{rad} + Q_{ved} + Q_{ob} + Q_{vz} + Q_{vc} \quad (W) \quad (4.1.13)$$

4.2. VÝPOČET KOEFICIENTU COP

Výkonnosť peltierových článkov ovplyvňuje mnoho faktorov. Patria sem napríklad vlastnosti materiálu, rozmery a geometria článku, veľkosti peliet a ich počet. Efektivita článku je daná chladiacim faktorom, inak nazývaným aj koeficient účinnosti COP. Je to pomer chladiaceho výkonu článku a príkonu zdroja. Čím je vyššie COP, tým menej energie musíme článku dodať. Tento koeficient úzko súvisí s teplotným rozdielom dT . S rastúcim teplotným rozdielom klesá COP ako môžete vidieť v nasledujúcom obrázku. S rastúcim počtom stupňov modulu koeficient klesá výraznejšie.



Obr. 10 Závislosť COP na dT pre rôzne moduly [7]



Obr. 11 Termoelektrická dvojica [27]

Nasledujúce výpočty koeficientu účinnosti pochádzajú zo zdroja [27]. Ako prvé spočítame vlastnosti materiálu.

$$\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n \quad (V/K) \quad (4.2.1)$$

$$\zeta_{pn} = \zeta_p + \zeta_n \quad (\Omega m) \quad (4.2.2)$$

$$k_{pn} = k_p + k_n \quad \left(\frac{W}{mK} \right) \quad (4.2.3)$$

Počet termoelektrických dvojíc $n = 127$. Teploty studenej a teplej strany sa určia nasledovným výpočtom.

$$T_h = t_h + 273 \quad (K) \quad (4.2.4)$$

$$T_c = t_c + 273 \quad (K) \quad (4.2.5)$$

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (K) \quad (4.2.6)$$

Koeficient termoelektrickej účinnosti je

$$Z = \frac{\alpha_{pn}^2}{\zeta_{pn} k_{pn}} \quad (K^{-1}) \quad (4.2.7)$$

Bezrozmerný koeficient termoelektrickej účinnosti je

$$ZT_c = ZT_c \quad (-) \quad (4.2.8)$$

Následne spočítame odpor R a tepelnú vodivosť polovodičov K

$$R = \frac{\zeta_{pn} L}{A} \quad (\Omega) \quad (4.2.9)$$

$$K = \frac{k_{pn} A}{L} \quad (W/K) \quad (4.2.10)$$

- a) Ďalej nasleduje výpočet pre **maximálny výkon** chladienia. Ako prvý počítame prúd pre maximálny výkon chladienia.

$$I_{mv} = \frac{\alpha_{pn} T_c}{R} \quad (A) \quad (4.2.11)$$

Ďalej spočítame maximálny chladiaci výkon

$$Q_{mv} = n * \left(\alpha_{pn} T_c I_{mv} - \frac{1}{2} I_{mv}^2 R - K \Delta T \right) \quad (W) \quad (4.2.12)$$

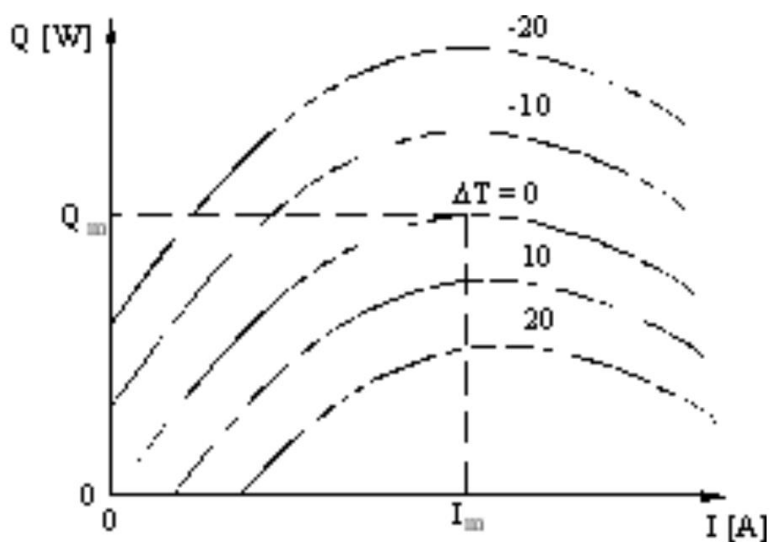
Potom určíme dodaný výkon

$$P_{mv} = n * (\alpha_{pn} \Delta T I_{mv} - I_{mv}^2 R) \quad (W) \quad (4.2.13)$$

Nakoniec spočítame koeficient účinnosti pre maximálny výkon

$$COP_{mv} = \frac{Q_{mv}}{P_{mv}} \quad (-) \quad (4.2.14)$$

Na obrázku číslo 11 môžete vidieť orientačnú závislosť chladiaceho výkonu na prúde.



Obr. 12 Závislosť chladiaceho výkonu na prúde [20]

- b) Následuje výpočet **maximálneho COP**. Ako prvé spočítame bezrozmerný koeficient termoelektrickej účinnosti s použitím priemeru teplôt teplej a studenej strany.

$$Z\bar{T} = Z \frac{T_h + T_c}{2} \quad (-) \quad (4.2.15)$$

Ďalej postupujeme analogicky ako pri predošlom výpočte, spočítame najskôr prúd, potom chladiaci výkon a nakoniec dodaný výkon zdrojom.

$$I_{COP} = \frac{\alpha_{pn}\Delta T}{R(\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1)} \quad (A) \quad (4.2.16)$$

$$Q_{COP} = n * \left(\alpha_{pn} T_c I_{COP} - \frac{1}{2} I_{COP}^2 R - K \Delta T \right) \quad (W) \quad (4.2.17)$$

$$P_{COP} = n * (\alpha_{pn} \Delta T I_{COP} - I_{COP}^2 R) \quad (W) \quad (4.2.18)$$

Z pomeru dodaného a spotrebovaného výkonu určíme maximálny koeficient účinnosti.

$$COP_{max} = \frac{Q_{COP}}{P_{COP}} \quad (-) \quad (4.2.19)$$

- c) Následne vykonáme výpočet pre **optimálny koeficient účinnosti**. Stredný prúd spočítame ako priemer prúdu pre maximálny výkon a prúdu pre maximálnu účinnosť.

$$I_{st} = \frac{I_{mv} + I_{COP}}{2} \quad (A) \quad (4.2.20)$$

Ďalej dopočítame dodaný a spotrebovaný výkon a z ich pomeru určíme stredný koeficient účinnosti

$$Q_{st} = n * \left(\alpha_{pn} T_c I_{st} - \frac{1}{2} I_{st}^2 R - K \Delta T \right) \quad (W) \quad (4.2.21)$$

$$P_{st} = n * (\alpha_{pn} \Delta T I_{st} - I_{st}^2 R) \quad (W)$$

(4.2.22)

$$COP_{st} = \frac{Q_{st}}{P_{st}} \quad (-)$$

(4.2.23)

Z predošlých výpočtov použijeme hodnotu Q_{po} . Pomerom tejto hodnoty a hodnoty stredného výkonu článku určíme počet článkov potrebných pre danú aplikáciu.

$$N = \frac{Q_{po}}{Q_{st}}$$

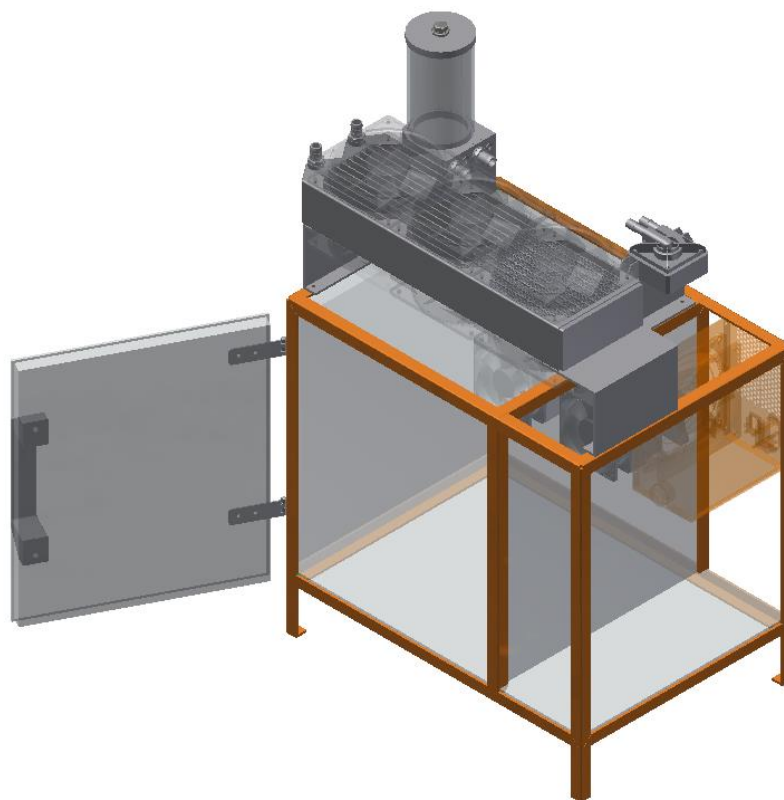
(4.2.24)

Z predošlých rovníc môžeme vidieť, že COP je závislé na vstupnom prúde I . Zväčšením prúdu sa zvýši teplotný rozdiel v polovodiči. Pri dosiahnutí určitej veľkosti prúdu sa už teplotný rozdiel ďalej nezväčšuje, táto hodnota sa nazýva maximálna hodnota prúdu.

5. NÁVRH CHLADENIA

5.1. NÁVRH GEOMETRIE A VÝPOČET TEPELNÝCH STRÁT

Cieľom tejto práce je návrh termoelektrického chladenia. Zvolili sme geometriu chladiaceho zariadenia vid' obrázok 13. Podľa nižšie uvedených výpočtov, sa určí množstvo tepla, ktoré bude potrebné odvádzať z chladeného priestoru. Na základe výpočtu bol navrhnutý chladiaci systém vzduch-kvapalina s núteným obehom kvapaliny. V úvahu pripadal aj systém vzduch-vzduch, ale tento systém je menej efektívny. Chladiaci systém pozostáva z týchto komponentov: nosný rám, čerpadlo, vonkajšie ventilátory, vnútorné ventilátory, radiátor, expanzná nádrž, peltierov článok, zdroj, rebrovaný chladič, vodný blok, tepelná izolácia, regulátor.



Obr. 13 Návrh chladiaceho zariadenia

Pre túto aplikáciu je zvolené čerpadlo 10W DCC-1T. Používané čerpadlo má maximálny prietok 500 litrov za hodinu. Potrebné napájacie napätie je 12 V a napájací prúd 600 mA. Hlučnosť čerpadla je 16 dB, čo je pomerne nízka hodnota. Vnútri v chladenom priestore musia byť použité ventilátory odolné voči vlhkým prostrediam kôli možnosti kondenzácie vody v tomto priestore. Zvolený ventilátor má označenie 3110MS-23W-B30 AC Axial Fan. Tento ventilátor zodpovedá norme IP54. V tomto označení číslo 5 znamená odolnosť voči vniknutiu pevných častíc a číslo 4 znamená odolnosť voči striekajúcej vode. Jeho hlučnosť je 24 dB a maximálne otáčky sú 2500

ot/min. Na radiátore je umiestnených šesť ventilátorov FAN-12025HBK. Potrebné napájacie napätie všetkých ventilátorov je 12 V a napájací prúd 280 mA. Maximálna hlučnosť jedného ventilátora je 32,8 dB. Maximálne otáčky sú 2600 ot/min a maximálny prietok 182 litrov za hodinu. Pre napájanie bol zvolený počítačový zdroj FSP HE-500. Tento zdroj poskytuje napájacie napätie na jednej vetve o veľkosti 12 V pri prúde 18 A. Vetvy sú v zdroji dve. Celkový výkon, ktorý je tak možné použiť pre napájanie peltierových článkov, čerpadla, ventilátorov a regulácie na 12 V je tak 432 W. Maximálny výkon článkov bude kôli menšiemu napätiu nižší. Na riadenie výkonu sa bude používať PID regulator. Expanzná nádrž, čerpadlo a vodný chladič sú od hornej steny chladničky odsadené a chladnička je zdvihnutá o 60 mm nad zemou. Je to kôli tomu, že celá chladnička bude pre lepšiu izoláciu pokrytá vrstvou polyuretánovej peny. Medzi vonkajšími ventilátormi sa nachádza radiátor EK L360 Triple 120 mm Liquid Cooler. Objem kvapaliny, ktorá sa v ňom môže nachádzať je 320 ml. Radiátor s možnosťou umiestnenia troch ventilátorov na každú stranu bol vybraný pre dosiahnutie väčšieho prenosu tepla medzi chladiacou kvapalinou a okolím. Čím je počet použitých ventilátorov väčší, tým môžu byť ich otáčky nižšie a systém je tým pádom menej hlučný a výkonovo porovnateľný so systémom s menším radiátorom. [21], [22], [24], [25]

Výpočet tepla, ktoré je potrebné odvádzať z chladničky

Legenda

Hodnoty na
dosadenie

Vypočítané
hodnoty

Poznámka

PASÍVNA ZÁŤAŽ:

a) Strata tepla vedením cez steny

| Názov veličiny | Označenie veličiny (jednotka) | Hodnota |
|------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| Vnútorne rozmery chladničky | | |
| Hĺbka | a (m) | 0.27 |
| Šírka | b (m) | 0.27 |
| Výška | c (m) | 0.32 |
| Vnútorná plocha | S (m ²) | 0.4644 |

Rozmery stien a ich hrúbky boli volené podľa

geometrie na obrázku 13.

Hrúbka jednotlivých vrstiev steny

| | | |
|--------------------------------------|-----------|-------|
| Hrúbka plexiskla | d_1 (m) | 0.015 |
| Hrúbka izolácie - polyuretánová pena | d_2 (m) | 0.04 |

Koeficienty prestupu tepla

| | | |
|--|-----------------------|-------|
| Koeficient vedenia tepla v plexiskle | λ_1 (W/(K*m)) | 0.19 |
| Koeficient vedenia tepla v polyuretáne | λ_2 (W/(K*m)) | 0.019 |

| | | |
|--|---------------------------------------|-------|
| Koeficient konvekcie medzi vonkajšou stenou a vzduchom | α_1 (W/(K*m ²)) | 11.06 |
| Koeficient konvekcie medzi vnútornou stenou a vzduchom | α_2 (W/(K*m ²)) | 18.08 |

Koeficienty boli zvolené podľa zdroja [26]

| | | |
|----------------------------|--------------------------------|------|
| Tepelný odpor steny | R_s (K*m ² /W) | 2.32 |
|----------------------------|--------------------------------|------|

Teploty vzduchu

| | | |
|-----------------------|-------------------|----|
| Teplota okolia [°C] | T_{ok} (°C) | 22 |
| Vnútorná teplota [°C] | T_{vn} (°C) | 5 |
| Rozdiel teplôt [°C] | ΔT_1 (°C) | 17 |

| | | |
|---|-------------------------|------|
| Merný tepelný tok stenami chladiaceho boxu | q (W/m ²) | 7.29 |
|---|-------------------------|------|

Teploty stien chladiaceho boxu

| | | |
|--|---------------|-------|
| Teplota na vonkajšej stene | T_{os} (°C) | 21.34 |
| Teplota rozhrania medzi vrstvami steny | T_{st} (°C) | 18.67 |
| Teplota na vnútornej stene | T_{vs} (°C) | 5.40 |

| | | |
|--|-----------|------|
| Celkový únik tepla stenami chladiaceho boxu | Q_s (W) | 3.38 |
|--|-----------|------|

b) Strata tepla radiáciou

| | | |
|---------------------------------------|---|-----------|
| Požadovaná teplota chladeného objektu | T_f (°C) | 5 |
| Počiatková teplota chladeného objektu | T_p (°C) | 22 |
| Stefan-Boltzmanova konštanta | S_{bk} [W/(K ⁴ *m ²)] | 5.667E-08 |
| Faktor tvaru | F (-) | 1 |

| | | |
|-------------------------------|-----------------|-------------|
| Emisivita | $\epsilon (-)$ | 1 |
| Strata tepla radiáciou | Qrad (W) | 6.41 |

c) Strata tepla prúdením

| | | |
|--|---------------------------------------|--------|
| Teplota vzduchu v chladenom priestore [°C] | Tvn (°C) | 5 |
| Teplota chladeného objektu | Tok (°C) | 22 |
| Plocha objektu | Sob (m ²) | 0.0706 |
| Koeficient prestupu tepla | α_v [W/(K*m ²)] | 21.7 |

Koeficient α bol zvolený podľa zdroja [26]

| | | |
|--|----------------|--------------|
| Strata tepla spôsobená prúdením | Qved(W) | 26.07 |
|--|----------------|--------------|

AKTÍVNA ZÁŤAŽ

a) Výkon potrebný na schladenie objektu

Rozmery objektu

Volili sme objekt, ktorý predstavoval nádobu s vodou o objeme približne 1,5 l.

| | | |
|---------------------------------------|---|--------|
| Výška | ho (m) | 0.2 |
| Polomer | ro (m) | 0.05 |
| Dĺžka steny | ao (m) | 0 |
| Šírka steny | bo (m) | 0 |
| Obsah ak valec | Sov (m ²) | 0.0706 |
| Obsah ak kváder | Sok (m ²) | 0 |
| Objem ak valec | Vov (m ³) | 0.0015 |
| Objem ak kváder | Vok (m ³) | 0 |
| Hustota objektu | ρ_o (kg/m ³) | 1000 |
| Hmotnosť objektu | mo (kg) | 1.57 |
| Merná tepelná kapacita | co (J*kg ⁽⁻¹⁾ *K ⁽⁻¹⁾) | 4180 |
| Počiatočná teplota chladeného objektu | Tp (°C) | 22 |
| Požadovaná teplota chladeného objektu | Tf (°C) | 5 |

| | | |
|------------------|-------------------|----------|
| Teplotný rozdiel | ΔT_2 (°C) | 17 |
| Teplo | q_0 (J) | 111620.7 |

Výpočet sme vykonali pre tri rôzne doby chladenia.

| | | |
|--|----------------|--------|
| Výkon pri ochladení za 10 minút [W] | Q_{ob10} (W) | 186.03 |
| Výkon pri ochladení za 30 minút [W] | Q_{ob30} (W) | 62.01 |
| Výkon pri ochladení za 60 minút [W] | Q_{ob60} (W) | 31.06 |

b) Výkon potrebný na schladenie vnútorného vzduchu

| | | |
|---------------------------------|---|---------|
| Objem vzduchu [m ³] | V_v (m ³) | 0.0217 |
| Hustota vzduchu | ζ_v (kg/m ³) | 1.29 |
| Hmotnosť vzduchu | m_v (kg) | 0.0280 |
| Merná tepelná kapacita | c_{vz} (J*kg ⁻¹ *K ⁻¹) | 1000.01 |
| Pôvodná teplota vzduchu [°C] | T_{vp} (°C) | 22 |
| Požadovaná teplota vzduchu [°C] | T_{vf} (°C) | 5 |
| Teplotný rozdiel [°C] | ΔT_v (°C) | 17 |
| Teplo [J] | q_v (J) | 477.14 |

| | | |
|--|----------------|-------|
| Výkon pri ochladení za 10 minút [W] | Q_{vz10} (W) | 0.795 |
| Výkon pri ochladení za 30 minút [W] | Q_{vz30} (W) | 0.265 |
| Výkon pri ochladení za 60 minút [W] | Q_{vz60} (W) | 0.132 |

c) Stráty tepla spôsobené ventilátormi v chladiacom boxe

| | | |
|--------------------------------|---------------|------|
| Prúd I | I_{ven} (A) | 0.05 |
| Napätie U | U_{ven} (V) | 12 |
| Teplo vyžarené spotrebičom [W] | Q_{ven} (W) | 0.6 |
| Počet spotrebičov | n_v [-] | 2 |

V chladničke sa nachádzajú dva ventilátory.

| | | |
|--|--------------|-----|
| Celkové stráty spôsobené ventilátormi [W] | Q_{vc} (W) | 1.2 |
|--|--------------|-----|

| | | |
|--|----------------|--------|
| Celkové tepelné stráty (10 minút) | Q_{po10} (W) | 224.50 |
| Celkové tepelné stráty (30 minút) | Q_{po30} (W) | 99.95 |
| Celkové tepelné stráty (60 minút) | Q_{po60} (W) | 68.81 |

Podľa výpočtu vidíme, že na vychladenie nádoby s vodou za 10 minút potrebujeme pomerne veľký výkon. Naväzujúci výpočet vykonáme pre všetky tri hodnoty tepelných strát.

5.2. VÝBER PELTIEROVHO ČLÁNKU A VÝPOČET COP

Na základe výpočtu z predchádzajúcej kapitoly sme vybrali vhodný peltierov článok. Volili sme článok TEC1-12710. Tieto články majú rozmery 40 mm x 40 mm x 3,3 mm ich maximálny výkon je 89W pri maximálnom napätí 15,8V. Napájací prúd je 10,5A. Maximálne ΔT tohoto článku je 67°C. [23]

Výpočet optimálneho pomeru COP a potrebného počtu modulov na jeho dosiahnutie.

Rozmery polovodičov

| | | |
|--|---------------------------|------------|
| Výška | L , (m) | 0.0019 |
| Šírka | a_p , (m) | 0.0015 |
| Plocha podstavy jedného polovodiča | A_p , (m ²) | 0.00000225 |
| Plocha podstavy termoelektrickej dvojice | A , (m ²) | 0.0000045 |

Polovodiče p a n majú rovnaké rozmery.

Materiálové vlastnosti polovodičov

Polovodič typu N:

| | | |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------|
| Seebeckov koeficient polovodiča | α_n , (V/K) | -0.000212 |
| Teplotná vodivosť polovodiča | k_n , (W/mK) | 1.5 |
| Merný elektrický odpor polovodiča | ζ_n , (Ω m) | 0.000014 |

Polovodič typu P:

| | | |
|-----------------------------------|---------------------------|----------|
| Seebeckov koeficient polovodiča | α_p , (V/K) | 0.000212 |
| Teplotná vodivosť polovodiča | k_p , (W/mK) | 1.5 |
| Merný elektrický odpor polovodiča | ζ_p , (Ω m) | 0.000014 |

Materiálové vlastnosti boli zvolené po osobnej konzultácii s vedúcim bakalárskej práce.

Celkové hodnoty daných materiálových vlastností

| | | |
|--|------------------------------|----------|
| Celkový Seebeckov koeficient polovodičov | α_{pn} , (V/K) | 0.000424 |
| Celková teplotná vodivosť polovodičov | k_{pn} , (W/mK) | 3 |
| Celkový merný elektrický odpor polovodičov | ζ_{pn} , (Ω m) | 0.000028 |

| | | |
|--|--------------|-----|
| Počet termoelektrických dvojíc | n , (-) | 127 |
| Teplota teplej strany článku v stupňoch celzia | t_h , (°C) | 30 |
| Teplota studenej strany článku v stupňoch celzia | t_c , (°C) | 3 |

| | | |
|--|------------------|--------|
| Teplota teplej strany článku v Kelvínoch | T_h , (K) | 303.15 |
| Teplota studenej strany článku v Kelvínoch | T_c , (K) | 276.15 |
| Teplotný rozdiel | ΔT , (K) | 27 |

| | | |
|---|--------------------|-------|
| Koeficient termoelektrickej účinnosti | Z , (1/K) | 0.002 |
| Bezrozmerný Koeficient termoelektrickej účinnosti | ZT , (-) | 0.591 |
| Vnútný odpor termoelektrickej dvojice | R , (Ω) | 0.012 |
| Teplná vodivosť termoelektrickej dvojice | K , (W/K) | 0.007 |

a) Výpočet COP pre maximálny výkon chladenia

| | | |
|------------------------|------------------|-------|
| Prúd | I_{mv} , (A) | 9.90 |
| Vyprodukovaný výkon | Q_{mv} , (W) | 49.27 |
| Dodaný výkon zo zdroja | P_{mv} , (W) | 161.6 |
| Koeficient COP | COP_{mv} , (-) | 0.305 |

b) Výpočet COP pre maximálnu účinnosť chladenia

| | | |
|---|-------------------|-------|
| Bezrozmerná termoelektrická účinnosť z priemerov teplôt | Z_t , (-) | 0.619 |
| Prúd | I_{cop} , (A) | 3.55 |
| Vyprodukovaný výkon | Q_{cop} , (W) | 18.96 |
| Dodaný výkon zo zdroja | P_{cop} , (W) | 24.08 |
| Koeficient COP | COP_{cop} , (-) | 0.787 |

c) Výpočet COP pre optimálnu účinnosť chladenia

| | | |
|------------------------|------------------|-------|
| Prúd | I_{st} , (A) | 6.72 |
| Vyprodukovaný výkon | Q_{st} , (W) | 41.69 |
| Dodaný výkon zo zdroja | P_{st} , (W) | 77.72 |
| Koeficient COP | COP_{st} , (-) | 0.536 |

| | | |
|--------------------------|----------------|------|
| Požadovaný počet modulov | N_{10} , (-) | 5.38 |
| Požadovaný počet modulov | N_{30} , (-) | 2.39 |
| Požadovaný počet modulov | N_{60} , (-) | 1.65 |

Z výsledkov môžeme vidieť, že pre vychladenie vody v nádobe na teplotu 3 °C za 10 minút v chladničke našich rozmerov by sme potrebovali 6 modulov. My sme volili použitie 2 modulov. Tento počet by bol dostačujúci na bežné používanie chladničky.

6. ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo popísať fyzikálny princíp termoelektrickej premeny, matematicky popísať používané matematické modely pre Peltierove články. Ďalej bolo cieľom spísať prehľad možných spôsobov napájania a regulácie termoelektrického chladenia a vykonať konštrukčný návrh a výpočet podľa vybranej aplikácie a dosiahnuť kompromis medzi maximálnym výkonom a maximálnou účinnosťou.

Ako aplikáciu Peltierovho článku sme zvolili chladenie chladničky malých rozmerov na vychladzovanie nápojov, prípadne malých vzorkov. Navrhli sme chladiaci systém s rozmermi chladeného priestoru 270 mm x 270 mm x 320mm. Steny chladničky sme volili z plexiskla hrúbky 15 mm. Kôli lepšej izolácii sme navrhli izoláciu o hrúbke 40mm z polyuretánovej peny. Výpočtom chladenia sme zistili, že ak chceme približne 1,5 l nádobu s vodou ochladiť z teploty 22 °C na teplotu 5 °C za 60 minút v chladničke našich rozmerov tak potrebujeme odvádzať výkon približne 69 W. Na základe tohto výpočtu sme sa rozhodli pre použitie modulu TEC1-12710. Najvyšší dosiahnuteľný koeficient účinnosti tohto modulu je podľa našich výpočtov 0.787. Pri optimálnej účinnosti modulu, ktorá činí hodnotu 0,5365 sú potrebné dva moduly na odvádzanie tepla z chladničky. Pri použití šiestich modulov bude nádoba s vodou ochladená na rovnakú teplotu už za 10 minút. S väčším počtom modulov avšak rastú prevádzkové náklady a taktiež by sa musel voliť výkonnejší zdroj. Z tohto dôvodu by sme radšej volili úspornejšiu cestu a pri konštrukcii použili dva termoelektrické moduly.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] Tetch frequently asked questions [online]. Dostupný z WWW: <<https://tetch.com/faqs/#1>>
- [2] D.M. ROWE, *Thermoelectrics handbook Macro to nano* Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group. 2006, ISBN 0-8493-2264-2
- [3] Katedra leteckej technickej prípravy [online]. 2009 Dostupný z WWW: <<http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/241>>
- [4] Tetch, TEM Mounting & Installation [online]. 2007-02-26 Dostupný z WWW: <https://tetch.com/wp-content/uploads/2013/11/tem_thermoelectric_module_mounting_procedure.pdf>
- [5] Ferrotec Thermal Reference Guide [online]. Dostupný z WWW: <<https://thermal.ferrotec.com/technology/thermal/thermoelectric-reference-guide>>
- [6] GOLDSMID, H. J. Introduction to thermoelectricity. Heidelberg : Springer 2009 ISBN 978-3-642-00715-6
- [7] Laird Technologies [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.Lairdtech.com/brandworld/library/THR-BROThermal%20Handbook%200110.pdf>>
- [8] RMT Thermoelectric cooling solutions [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.rmtltd.ru/products/software/standard/>>
- [9] RF cafe – electronics [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.rfcafe.com/references/electrical/solder.htm>>
- [10] Valter byl - regulácie [online]. Dostupný z WWW: <<http://valter.był.cz/sites/default/files/regulace.pdf>>
- [11] Reissmann, product data sheet [online]. Dostupný z WWW: <http://www.reissmann.com/_media/produkte/pdf/st_pt_100_en.pdf>
- [12] Odborné časopisy, elektrotechnika [online]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30765>
- [13] Competition systems product data sheet [online]. Dostupný z WWW: <http://www.competitionssystems.co.uk/uploads/mediacentre/20100524022442-PT_1000.pdf>
- [14] Platinum RTD product data sheet [online]. Dostupný z WWW: <<http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~iqup/domeenv/PDF/pt100plat.pdf>>

- [15] WIKA product data sheet [online]. Dostupný z WWW: http://www.wika.us/upload/US_DS_TE2401_en_us_18902.pdf
- [16] Aliexpress pictures [online]. Dostupný z WWW: http://www.aliexpress.com/store/product/DS18B20-18B20-Programmable-Resolution-1-Wire-Digital-Thermometer-ICs-Free-Shipping/205036_454802692.html
- [17] Milan Pavelek, Experimentální metody v technice prostředí Brno : Akademické nakladatelství CERM. 2007, ISBN 978-80-214-3426-4
- [18] HiCOOL Electronics [online]. Dostupný z WWW: <http://www.its.org/zlinks/hicool-electronics-corp-hicooltec>
- [19] Thermoelectric cooler construction [online]. Dostupný z WWW: http://www.tec-microsystems.com/EN/Intro_Thermoelectric_Coolers_files/Thermoelectric%20Coolers%20Basics.pdf
- [20] Odborný internetový časopis hw [online]. Dostupný z WWW: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termobaterie-2.html>
- [21] Koolance Liquid cooling solutions Science 2000 [online]. Dostupný z WWW: <http://koolance.com/fan-120x38mm-184cfm>
- [22] Thermaltake [online]. Dostupný z WWW: http://www.thermaltake.com/products-model.aspx?id=C_00000749
- [23] TME Electronic components [online]. Dostupný z WWW: <http://www.tme.eu/en/details/pm-40x40-89/peltier-modules/stonecold/tec1-12710/>
- [24] Minebea [online]. Dostupný z WWW: <http://www.nmbtc.com/fans/part-numbers/AC-Axial-80mm/3110MS-23W-B30-A00/6015>
- [25] FrozenCPU [online]. Dostupný z WWW: http://www.frozenscpu.com/products/18965/ex-wat-250/EK_L360_Complete_Triple_120mm_Liquid_Cooling_Kit_EK-KIT_L360.html#blank
- [26] Marlow Industries Inc. Thermoelectric cooling system design guide, Publication Number 017-7939 Rev 2
- [27] H. S. Lee. *Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells* 26 OCT 2010, ISBN: 9780470496626

ZOZNAM VELIČÍN

| Značka | Veličina | Jednotka |
|-------------|--|-----------------|
| a | Hĺbka | m |
| a_o | Dĺžka steny | m |
| a_p | Šírka polovodiča | m |
| A | Plocha podstavy termoelektrickej dvojice | m^2 |
| A_p | Plocha podstavy jedného polovodiča | m^2 |
| b | Šírka | m |
| b_o | Šírka steny | m |
| c | Výška | m |
| c_o | merná tepelná kapacita objektu | $\frac{J}{kgK}$ |
| c_{vz} | Merná tepelná kapacita vzduchu | $\frac{J}{kgK}$ |
| COP_{COP} | Koeficient účinnosti | - |
| COP_{mv} | Koeficient účinnosti | - |
| COP_{st} | Koeficient účinnosti | - |
| d_1 | Hrúbka plexiskla | m |
| d_2 | Hrúbka izolácie | m |
| e | Emisivita | - |
| F | Súčiniteľ tvaru | - |
| h_o | Výška objektu | m |
| I | Prúd | A |
| I_{COP} | Prúd pri maximálnom COP | A |
| I_{mv} | Prúd pri maximálnom výkone | A |
| I_{ven} | Prúd dodaný do ventilátoru | A |
| I_{st} | Prúd pri optimálnom COP | A |
| k_n | Tepelná vodivosť n polovodiča | WK^{-1} |
| k_p | Tepelná vodivosť p polovodiča | WK^{-1} |
| k_{pn} | Celková tepelná vodivosť | WK^{-1} |
| K | Tepelná vodivosť | WK^{-1} |
| L | Výška polovodiča | m |
| m_o | Hmotnosť objektu | kg |
| m_v | Hmotnosť vzduchu | kg |
| n | Počet termoelektrických dvojíc | - |
| n_v | Počet ventilátorov | - |
| N_{10} | Požadovaný počet modulov | - |
| N_{30} | Požadovaný počet modulov | - |
| N_{60} | Požadovaný počet modulov | - |

| | | |
|------------|---------------------------------------|---------------------|
| P | Príkon | W |
| P_{COP} | Dodaný výkon zdroja | W |
| P_{mv} | Dodaný výkon zdroja | W |
| P_{st} | Dodaný výkon zdroja | W |
| q | Merný tepelný tok stenami chladničky | $\frac{W}{m^2}$ |
| q_o | Teplo odoberané objektu | J |
| q_v | Teplo odoberané vzduchu | J |
| Q | Teplo | J |
| Q_{COP} | Vyprodukovaný výkon | W |
| Q_{mv} | Maximálny vyprodukovaný výkon | W |
| Q_{ob10} | Výkon na ochladenie objektu | W |
| Q_{ob30} | Výkon na ochladenie objektu | W |
| Q_{ob60} | Výkon na ochladenie objektu | W |
| Q_{po10} | Celkové tepelné straty | W |
| Q_{po30} | Celkové tepelné straty | W |
| Q_{po60} | Celkové tepelné straty | W |
| Q_{rad} | Strata tepla radiáciou | W |
| Q_s | Celkový únik tepla stenami chladničky | W |
| Q_{st} | Optimálny vyprodukovaný výkon | W |
| Q_{vc} | Celkové straty spôsobené ventilátormi | W |
| Q_{ved} | Strata tepla prúdením | W |
| Q_{ven} | Straty spôsobené jedným ventilátorom | W |
| Q_{vz10} | Výkon na ochladenie vzduchu | W |
| Q_{vz30} | Výkon na ochladenie vzduchu | W |
| Q_{vz60} | Výkon na ochladenie vzduchu | W |
| ro | Polomer objektu | m |
| R | Elektrický odpor | Ω |
| R_s | Tepelný odpor steny | $\frac{m^2 K}{W}$ |
| S | Vnútorná plocha | m^2 |
| S_{bk} | Stefan-Boltzmanova konštanta | $\frac{W}{K^4 m^2}$ |
| S_{ob} | Plocha objektu | m^2 |
| S_{ok} | Obsah kvádra | m^2 |
| S_{ov} | Obsah válcu | m^2 |
| t | Doba chladnutia | s |
| t_c | Teplota studenej strany článku | $^{\circ}C$ |
| t_h | Teplota studenej strany článku | $^{\circ}C$ |
| T | Termodynamická teplota | K |

| | | |
|---------------|---|------------------|
| T_c | Teplota studenej strany článku v Kelvínoch | K |
| T_f | Požadovaná teplota chladeného objektu | K |
| T_h | Teplota teplej strany článku v Kelvínoch | K |
| T_{ok} | Teplota okolia | K |
| T_{os} | Teplota na vonkajšej stene | K |
| T_p | Počiatková teplota chladeného objektu | K |
| T_{st} | Teplota rozhrania medzi vrstvami steny | K |
| T_{vf} | Požadovaná teplota vzduchu | K |
| T_{vn} | Vnútna teplota | K |
| T_{vs} | Teplota na vnútornej stene | K |
| ΔT | Teplotný rozdiel | K |
| ΔT_1 | Teplotný rozdiel | K |
| ΔT_2 | Teplotný rozdiel | K |
| U_{ven} | Napätie dodané do ventilátora | V |
| V_{ok} | Objem kvádra | m^3 |
| V_{ov} | Objem válca | m^3 |
| V_v | Objem vzduchu | m^3 |
| Z | Koeficient termoelektrickej účinnosti | K^{-1} |
| ZT | Bezrozmerný koeficient termoelektrickej účinnosti | - |
| α | Seebeckov koeficient | VK^{-1} |
| α_1 | Koeficient konvekcie tepla - vonkajšia stena | $\frac{W}{Km^2}$ |
| α_2 | Koeficient konvekcie tepla - vnútorná stena | $\frac{W}{Km^2}$ |
| α_n | Seebeckov koeficient polovodiča n | VK^{-1} |
| α_p | Seebeckov koeficient polovodiča p | VK^{-1} |
| α_{pn} | Celkový seebeckov koeficient | VK^{-1} |
| α_v | Koeficient konvekcie tepla – chladený objekt | $\frac{W}{Km^2}$ |
| λ_1 | Koeficient vedenia tepla v plexiskle | $\frac{W}{Km}$ |
| λ_2 | Koeficient vedenia tepla v polyuretáne | $\frac{W}{Km}$ |
| ζ_o | Hustota objektu | $\frac{Kg}{m^3}$ |
| ζ_v | Hustota vzduchu | $\frac{Kg}{m^3}$ |
| ζ_n | Merný elektrický odpor n polovodiča | Ωm |
| ζ_p | Merný elektrický odpor p polovodiča | Ωm |
| ζ_{pn} | Celková merný elektrický odpor | Ωm |
| π | Peltierov koeficient | V |
| φ | Účinnosť | - |

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Teploty tavenia pájok

Tab. 2 Odporúčané kompresné tlaky

ZOZNAM OBRÁZKOV

- Obr. 1 Seebeckov jav
- Obr. 2 Peltierov jav
- Obr. 3 Prenos tepla v článku
- Obr. 4 Závislosť tepelnej a elektrickej vodivosti materiálov
- Obr. 5 Rôzne tvary modulov
- Obr. 6 Peltierov článok
- Obr. 7 Schéma pájania článku
- Obr. 8 Priebeh napätia pri PWM regulátore
- Obr. 9 Priebeh teplôt pri PID regulácii
- Obr. 10 Závislosť COP na dT pre rôzne moduly
- Obr. 11 Termoelektrická dvojica
- Obr. 12 Závislosť chladiaceho výkonu na prúde
- Obr. 13 Návrh chladiaceho zariadenia

ZOZNAM PRÍLOH

Výpočet chladenia – Microsoft Excel